

电机学

同步电机的突然短路与振荡

东南大学电气工程学院

黄允凯



东南大学
电气工程学院



1

同步发电机突然短路的物理过程

2

同步电机的瞬态电抗和超瞬态电抗

3

三相突然短路电流

4

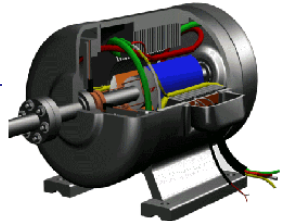
同步电机振荡的物理概念





- 突然短路
 - 是一个暂态过程
 - 从正常负载运行变化到稳态短路运行的过渡过程
- 电流的自由分量
 - 在过渡过程中，短路电流将包含按某些时间常数自由分量
 - 当自由分量衰减完毕，发电机便转入稳态短路运行
 - 突然短路初瞬的冲击短路电流可达额定电流的十几到二十多倍，将带来严重后果





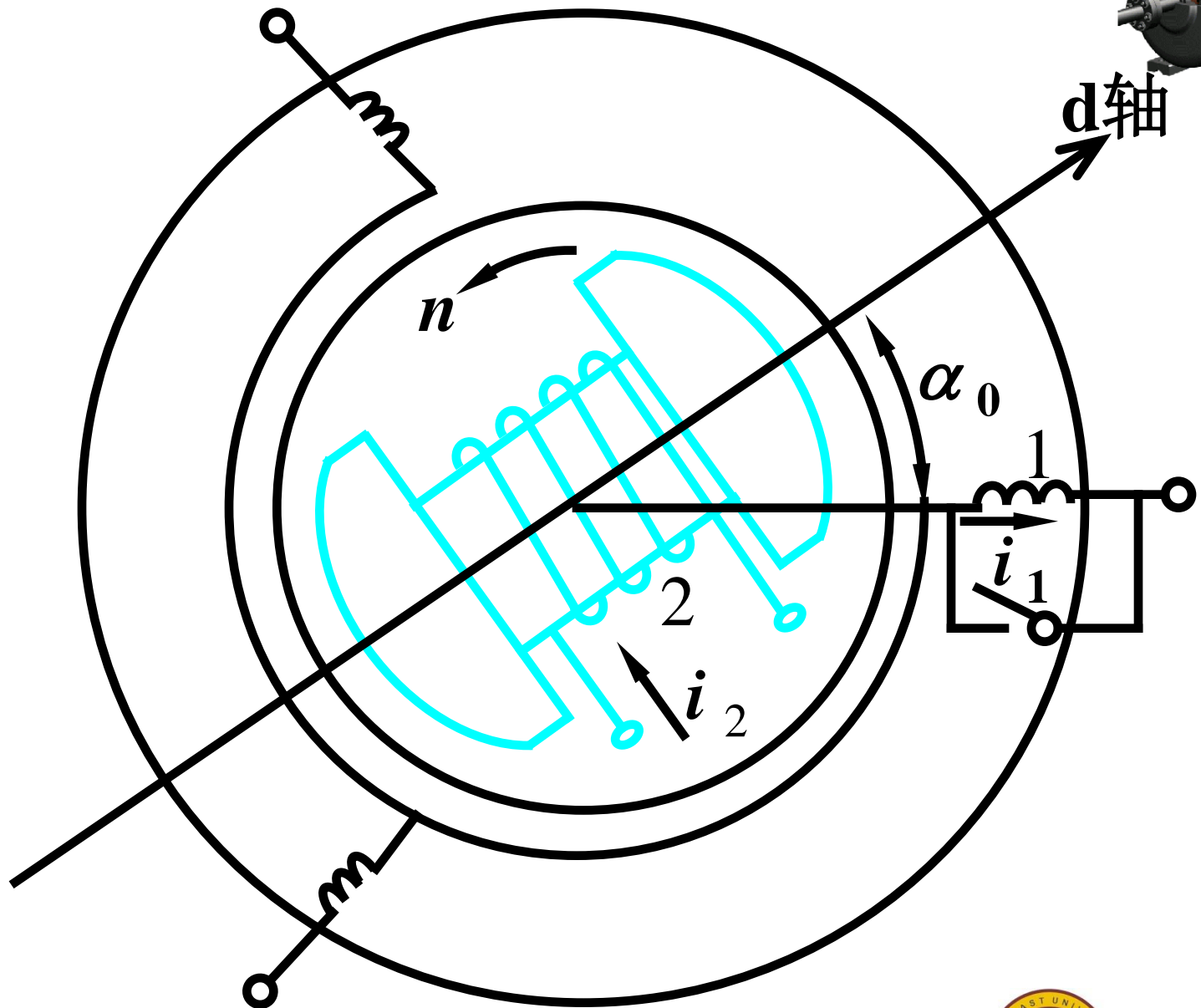
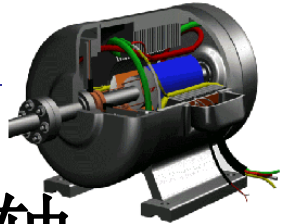
- 突然短路的分析

- 严格分析需要列出并求解多个回路的联立微分方程式组
- 更由于同步电机的转子激磁绕组为单相回路，阻尼绕组为不完整的多相电路，直轴交轴磁路又不对称，使问题变得非常复杂

- 简化方法

- 从磁链守恒原理出发，形象化地阐明突然短路时电机内的电磁过程，**重点弄清突然短路时电机参数和电流变化的物理概念**





说明超导体闭合回路磁链不变原理



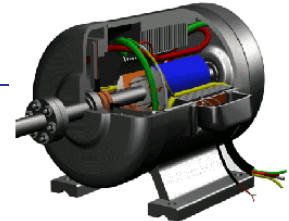


- 超导体闭合回路磁链不变原则
 - 在上图瞬间，合上开关使绕组1突然短路，绕组中的电压方程式为

$$ir + \frac{d\psi}{dt} = 0$$

- 如把电阻 r 略去，则 $\frac{d\psi}{dt} = 0$





- 上式的一般解为

$$\psi = \text{const}$$

- 设图示瞬间为 $t = 0$ ，绕组中的磁链为 $\psi_{t=0}$ ，于是可得根据起始条件求得的特解为

$$\psi = \psi_{t=0}$$

- 物理意义

- 没有电阻的闭合绕组的磁链不会变化，永远等于突然短路瞬间，即 $t = 0$ 时该绕组所匝链的磁链 $\psi_{t=0}$

- 结论

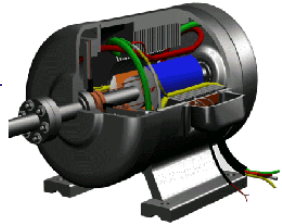
- 在没有电阻的闭合回路中，磁链将保持不变，称为磁链不变原则





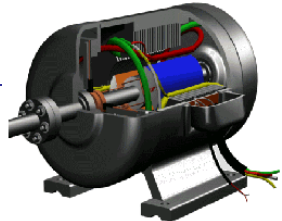
- 实际的闭合回路
 - 电阻总是存在的
 - 由于电阻的影响，磁链将逐渐变化，但因磁链不能突变，在突然短路的初瞬，仍可认为磁链保持不变
 - 短路初瞬实际情况仍和无电阻的超导体的情况相同





- 突然短路时的电机参数
 - 在正常运行情况下，定子磁场与转子绕组间没有相对运动
 - 定子磁场的振幅也保持恒定不变
 - 故定子磁场并不能在转子绕组中产生感应电势
 - 转子绕组的存在并不影响定子绕组的电抗

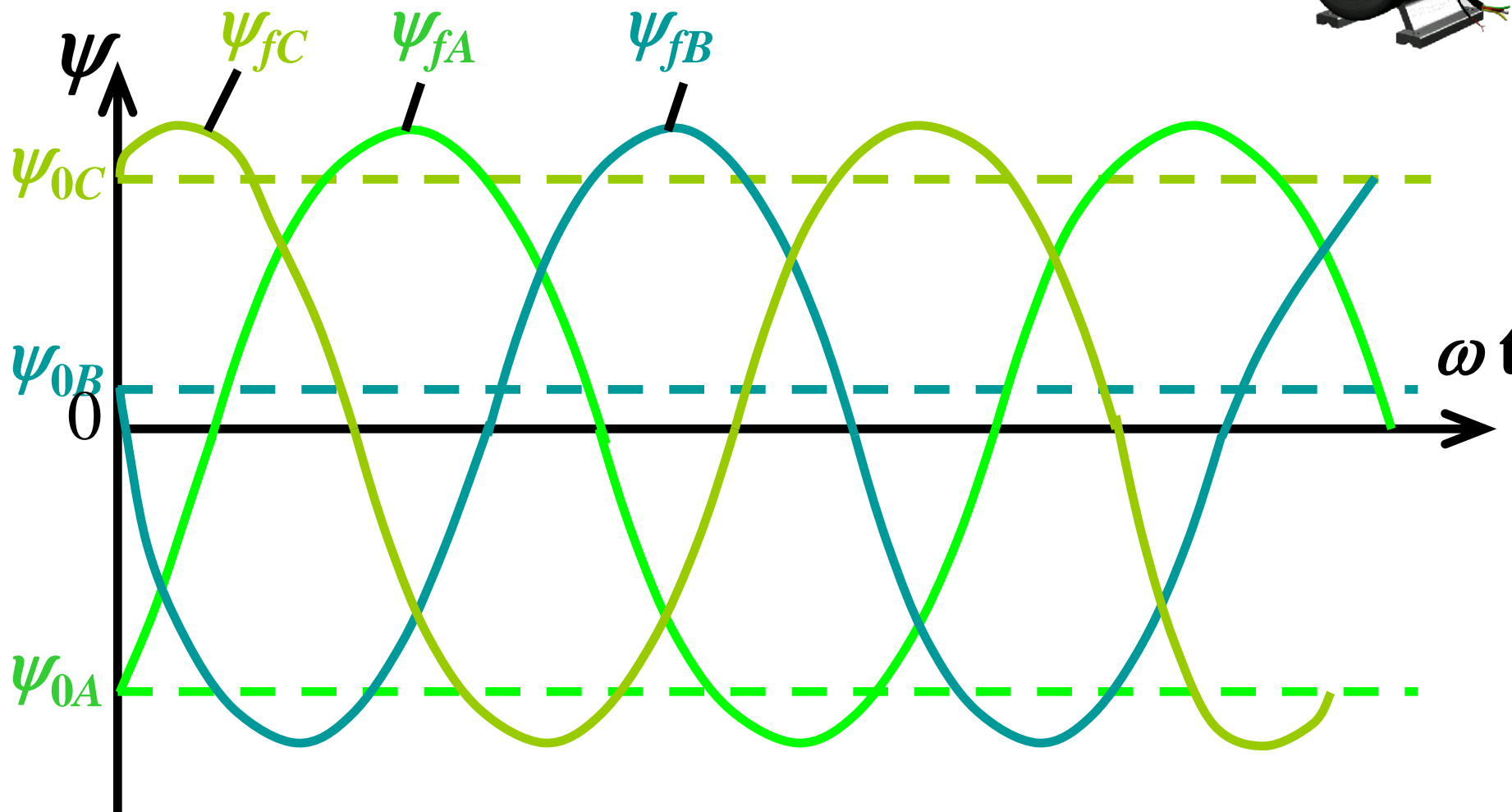
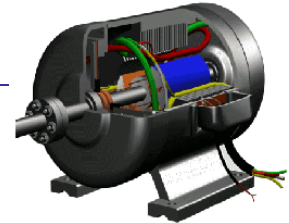




- 三相突然短路时的磁链

- 用磁链不变原则分析无阻尼绕组同步发电机空载运行时，在发电机出线端点处发生三相突然短路后电机各绕组中的磁链变化情况
- 假设励磁电流和转子转速保持不变，并且不计饱和影响，以便应用叠加原理

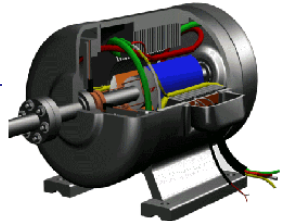




(a)

三相突然短路时磁链变化情况

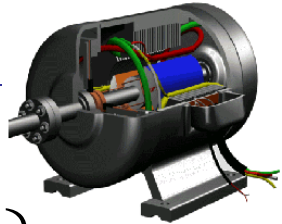




- 短路以后

- 转子继续以同步转速旋转，转子磁场对定子绕组形成的磁链 ψ_{fA} 、 ψ_{fB} 和 ψ_{fC} ，始终对时间按正弦规律变化
- 定子各绕组的磁链要保持为 ψ_{0A} 、 ψ_{0B} 和 ψ_{0C} 不变，还需由已闭合的定子绕组中产生感应电流，由该电流分别在各相绕组中建立磁链 ψ_{AA} 、 ψ_{BB} 和 ψ_{CC}
- 磁链 ψ_{AA} 、 ψ_{BB} 和 ψ_{CC} 的大小和随时间变化的规律取决于能分别和 ψ_{fA} 、 ψ_{fB} 和 ψ_{fC} 共同合成相应的 ψ_{0A} 、 ψ_{0B} 和 ψ_{0C}





$$\dot{\Psi}_{AA} + \dot{\Psi}_{fA} = \Psi_{0A}$$

$$\dot{\Psi}_{BB} + \dot{\Psi}_{fB} = \Psi_{0B}$$

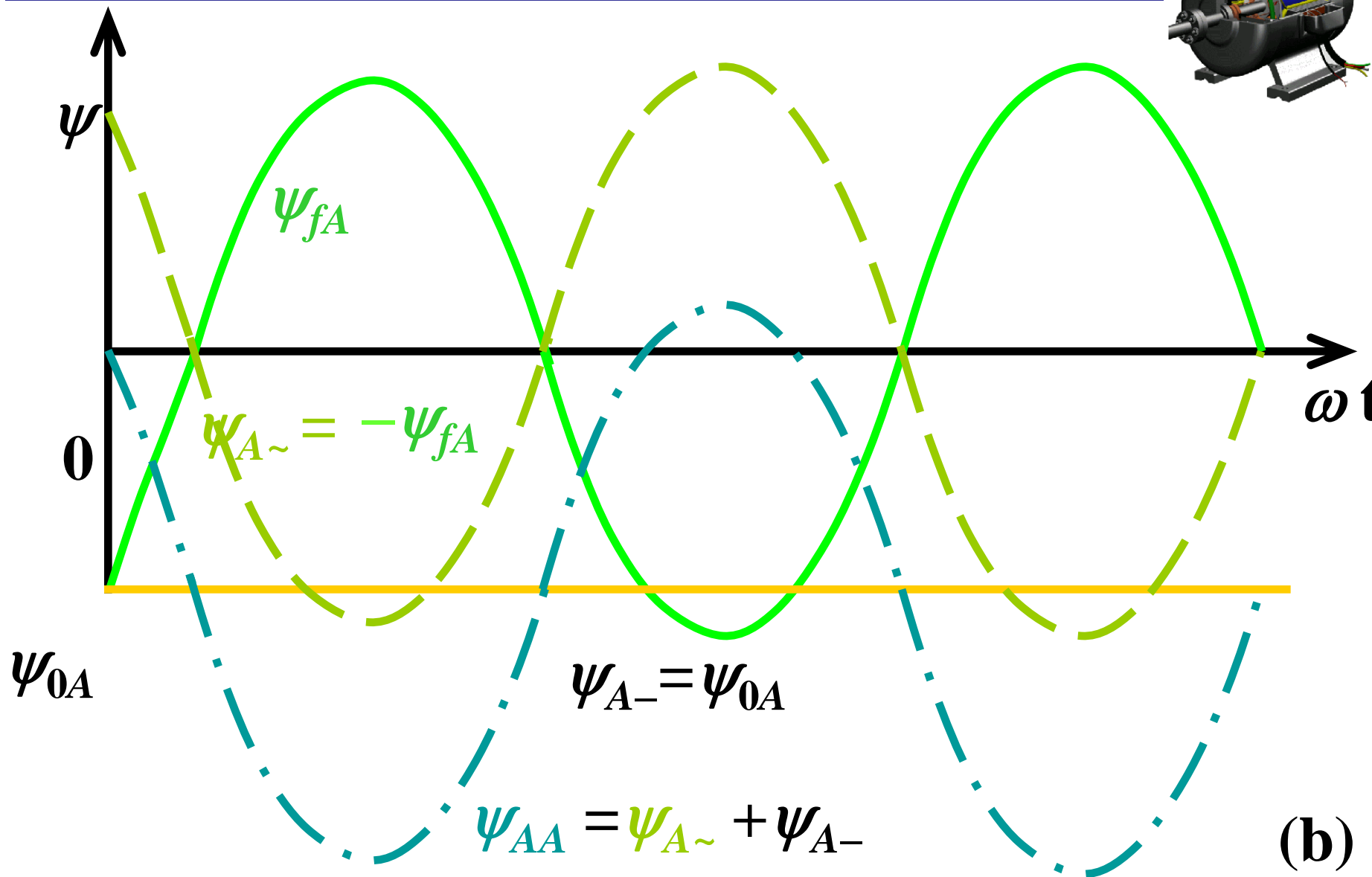
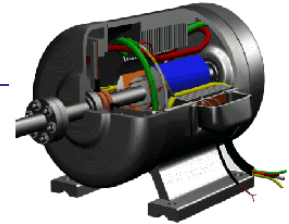
$$\dot{\Psi}_{CC} + \dot{\Psi}_{fC} = \Psi_{0C}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi}_{AA} &= \dot{\psi}_{A\sim} + \psi_{A-} \\ \dot{\psi}_{BB} &= \dot{\psi}_{B\sim} + \psi_{B-} \\ \dot{\psi}_{CC} &= \dot{\psi}_{C\sim} + \psi_{C-} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi}_{A\sim} &= -\dot{\psi}_{fA} \\ \dot{\psi}_{B\sim} &= -\dot{\psi}_{fB} \\ \dot{\psi}_{C\sim} &= -\dot{\psi}_{fC} \end{aligned} \right\}$$

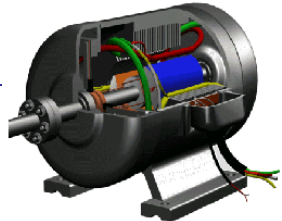
$$\left. \begin{aligned} \psi_{A-} &= \Psi_{0A} \\ \psi_{B-} &= \Psi_{0B} \\ \psi_{C-} &= \Psi_{0C} \end{aligned} \right\}$$





三相突然短路时磁链变化情况





- 转子绕组中的磁链

- 转子励磁电流建立匝链转子绕组的磁链用 ψ_{ff} 表示
- 不计转子回路的电阻，转子磁链将保持突然短路发生时的数值，即保持 ψ_{ff} 不变
- 现在由于定子电流产生的旋转磁场和直流磁场的出现，转子磁链守恒将被破坏
- 转子电路中必将引起感应电流以建立恰能抵消上述磁场对转子绕组形成的磁链。

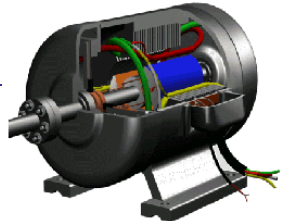




— 转子绕组中的直流分量

- 由定子电流中的交流分量（亦常称周期性分量）产生的 $\psi_{A\sim}$ 、 $\psi_{B\sim}$ 和 $\psi_{C\sim}$ 合成一圆形旋转磁场，和转子同步旋转，其匝链转子绕组的磁链为 ψ_{\sim} ，大小不变
- 转子绕组将感应一个直流分量电流才能产生一个 ψ_{f-} ，以抵消磁链 ψ_{\sim} ，即 $\psi_{f-} = -\psi_{\sim}$

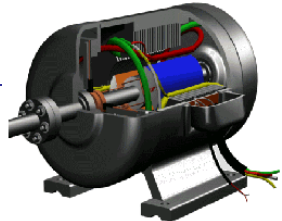




— 转子绕组中的交流分量

- 定子电流中的直流分量（亦常称为非周期性分量）产生直流磁场，在空间是静止的，对转子绕组的相对转速为同步转速
- 在转子中感应一交变电流，以建立匝链转子绕组的磁链 $\psi_{f\sim}$ ，来抵消定子产生的直流磁场在转子绕组中形成的磁链 ψ_- ，即有 $\psi_{f\sim} = -\psi_-$





• 转子绕组中的总磁链

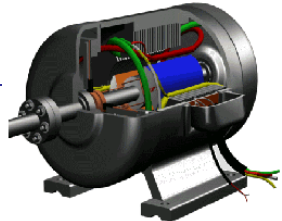
- 设励磁绕组中的电流产生的匝链本身绕组的总磁链 ψ_f ，则短路后励磁绕组中的电流和磁链为

$$\left. \begin{aligned} i_f &= I_{ff} + I_{f-} + i_{f\sim} \\ \psi_f &= \psi_{ff} + \psi_{f-} + \psi_{f\sim} \end{aligned} \right\}$$

• 考虑电阻

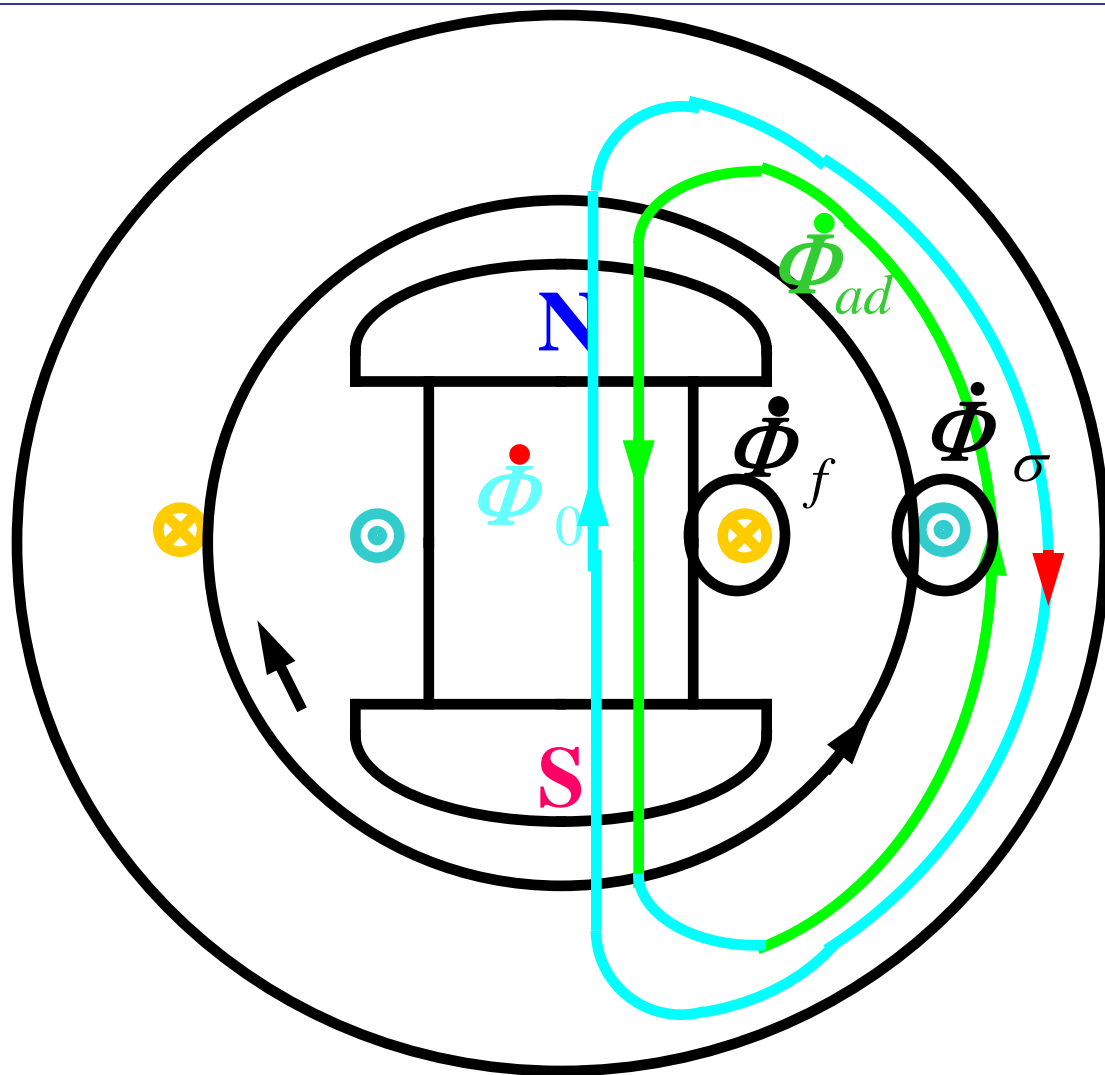
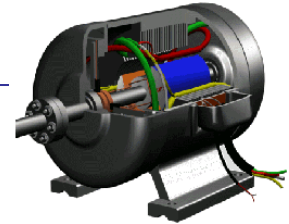
- 定子、转子回路均有电阻存在，所以上述各电流自由分量均按某些时间常数衰减，并最后消失
- 最终为稳态短路电流，转子回路将是正常外施的励磁电流





- 电抗
 - 大小与磁通所经过路径的磁阻有关
 - 磁阻小，所需的电流较小，电抗大
 - 磁阻大，所需的电流较大，电抗小
 - 与频率成正比
- 直轴瞬态电抗 x'_d
 - 三相稳态短路时，端电压 \dot{U}_A 等于零，电枢反应为纯去磁作用
 - 如不计电枢电阻和漏磁通的影响，由定子电流所产生的电枢反应磁通 ϕ_{ad} 与由转子电流所产生的磁通 ϕ_0 ，大小相等，方向相反

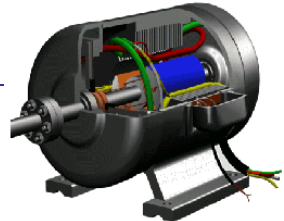




(a) 稳定短路

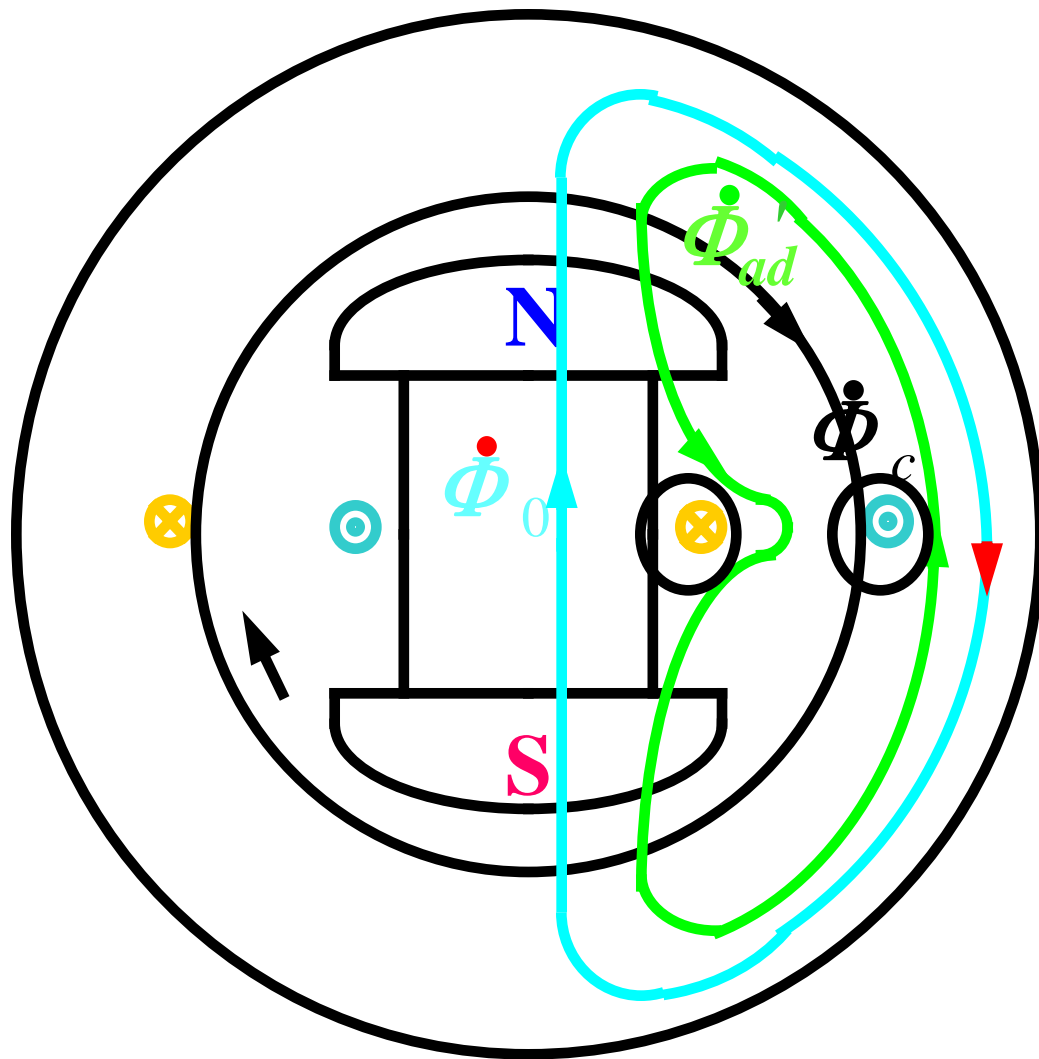
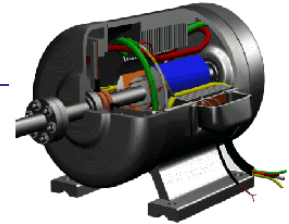
没有阻尼绕组的同步发电机短路时，
电枢磁通所经的路径





- 稳态短路时，电枢反应磁通间穿过转子铁芯而闭合，所遇到的磁阻较小，定子电流所遇到的电抗便为数值较大的直轴同步电抗 x_d
- 三相突然短路初瞬时的情形
 - 设发生短路前发电机为空载，故转子绕组只键链磁通 $\dot{\Phi}_0$ 和 $\dot{\Phi}_f$
 - 短路发生瞬间，磁链不能突变
 - 短路瞬间，转子中产生了一个磁化方向与电枢磁场相反的感应电流，它的磁通恰巧抵消了要穿过转子绕组的电枢反应磁通，于是保持了转子绕组所键链的磁通“守恒”

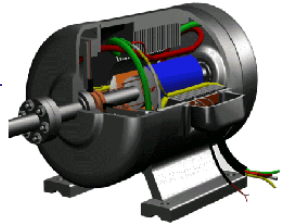




(b)突然短路瞬间

当没有阻尼绕组的同步发电机短路时，
电枢磁通所经的路径





- 直轴瞬态电抗或直轴暂态电抗

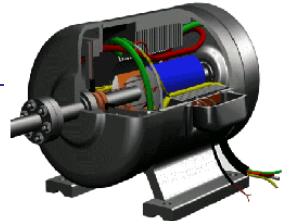
- 短路初瞬，短路电流的电枢反应磁通不能通过转子铁芯，而被挤到转子绕组外侧的漏磁路
- 定子短路电流所产生的磁通 $\dot{\Phi}_{ad}'$ 所经路线的磁阻变大
- 限制电枢电流的电抗变小，使突然短路初瞬有较大的短路电流。该电抗用 x_d' 表示，可见 x_d' 远较 x_d 为小。





- 转子绕组电阻的作用
 - 感应电流因电阻阻尼作用衰减消失，稳态时，电枢磁通便能穿过转子铁芯
 - 转子绕组的电阻使突然短路时较大的冲击电流逐渐减小，最后短路电流为 X_d 所限制
 - 电枢反应磁通 Φ_{ad} 是由三相交流电共同激励产生的

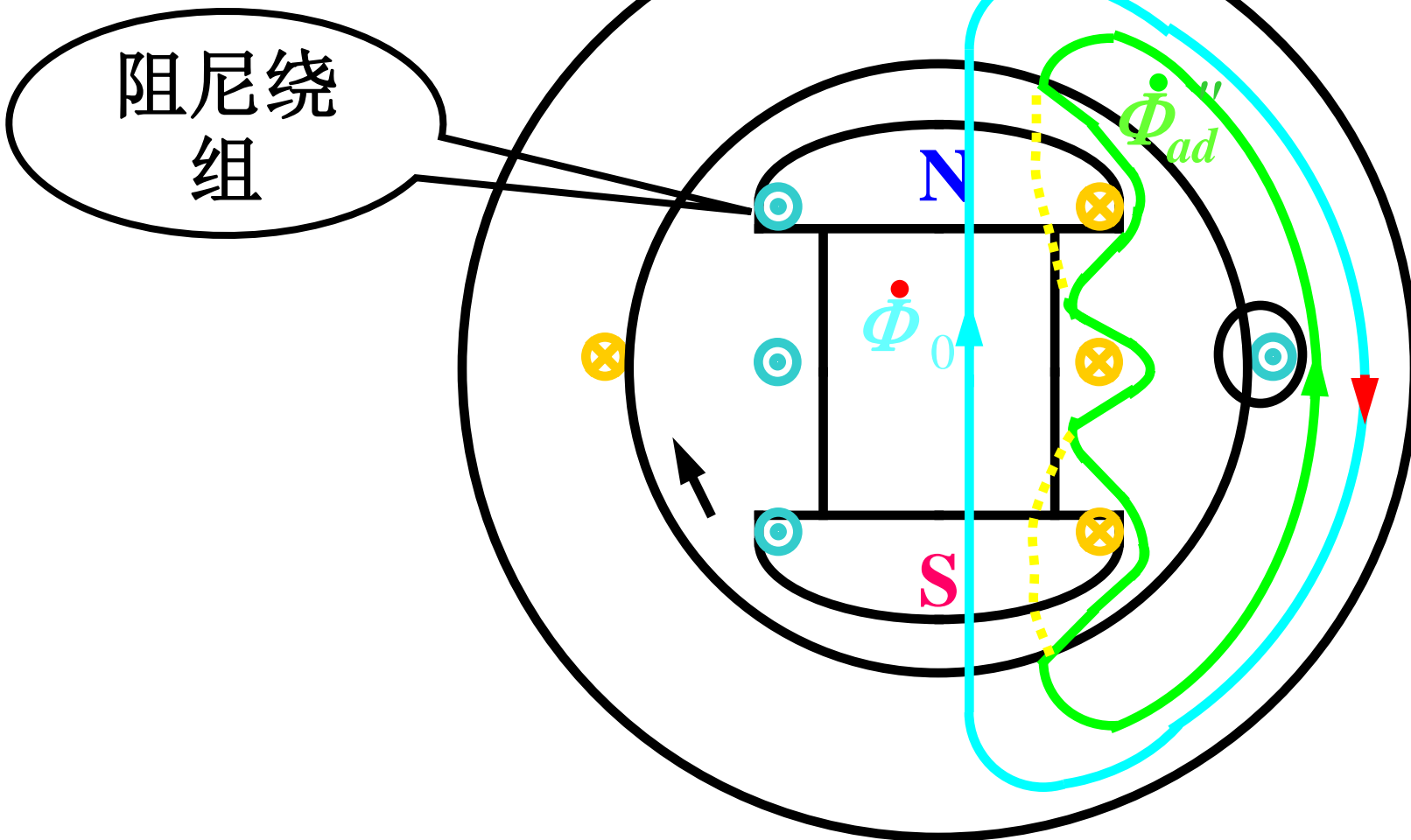




- 直轴超瞬态电抗 x''_d

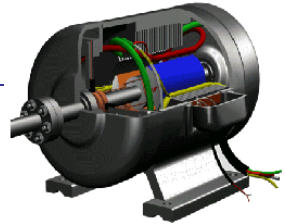
- 当转子上有阻尼绕组时，则因阻尼绕组也为闭合回路，它的磁链也不能突然改变
- 在短路初瞬，电枢磁通将被排挤在阻尼绕组以外
- 电枢磁通将依次经过空气隙、阻尼绕组旁的漏磁路和激磁绕组旁的漏磁路
- 磁路的磁阻更大了，与之相应的电抗将有更小的数值 x''_d 。 x''_d 称为直轴超瞬态电抗或直轴次暂态电抗





当同步发电机有阻尼绕组在短路初
瞬电枢磁通所经的路线





- 电流变化过程

- 在短路初瞬，定子绕组中的短路电流产生的磁通为 $\dot{\Phi}_{ad}''$
- 阻尼绕组中的感应电流先衰减完，电枢磁通即可穿过阻尼绕组，定子电流的磁通为 $\dot{\Phi}_{ad}'$
- 当激磁绕组中感应电流再衰减完，即达到稳态时，定子电流得磁通为 $\dot{\Phi}_{ad}$





超瞬态

阻尼绕组和激磁绕组均有感应电流

$$\Rightarrow \dot{\Phi}_{ad}'' \Rightarrow X_{ad}''$$

瞬态

激磁绕组有感应电流

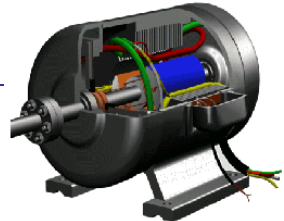
$$\Rightarrow \dot{\Phi}_{ad}' \Rightarrow X_{ad}'$$

稳态

激磁绕组没有感应电流

$$\Rightarrow \dot{\Phi}_{ad} \Rightarrow X_{ad}$$





• x'_d 和 x''_d 的表示式

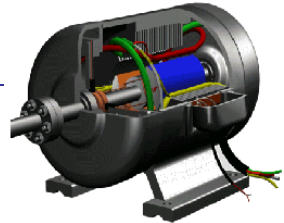
— 当同步发电机装有阻尼绕组时，电枢磁通在短路初瞬所经路线的磁导为

- 空气隙的磁导 Λ_{ad}
- 阻尼绕组旁的漏磁路的磁导 Λ_{1d}
- 激磁绕组旁的漏磁路的磁导 Λ_f

— 超瞬态电枢反应磁通所遇磁导

$$\Lambda''_{ad} = \frac{1}{\frac{1}{\Lambda_{ad}} + \frac{1}{\Lambda_f} + \frac{1}{\Lambda_{1d}}}$$





– 考虑漏磁后，电枢电流遇到的总磁导

$$\Lambda_d'' = \Lambda_\sigma + \Lambda_{ad}'' = \Lambda_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{\Lambda_{ad}} + \frac{1}{\Lambda_f} + \frac{1}{\Lambda_{1d}}}$$

– 电抗和磁导成正比

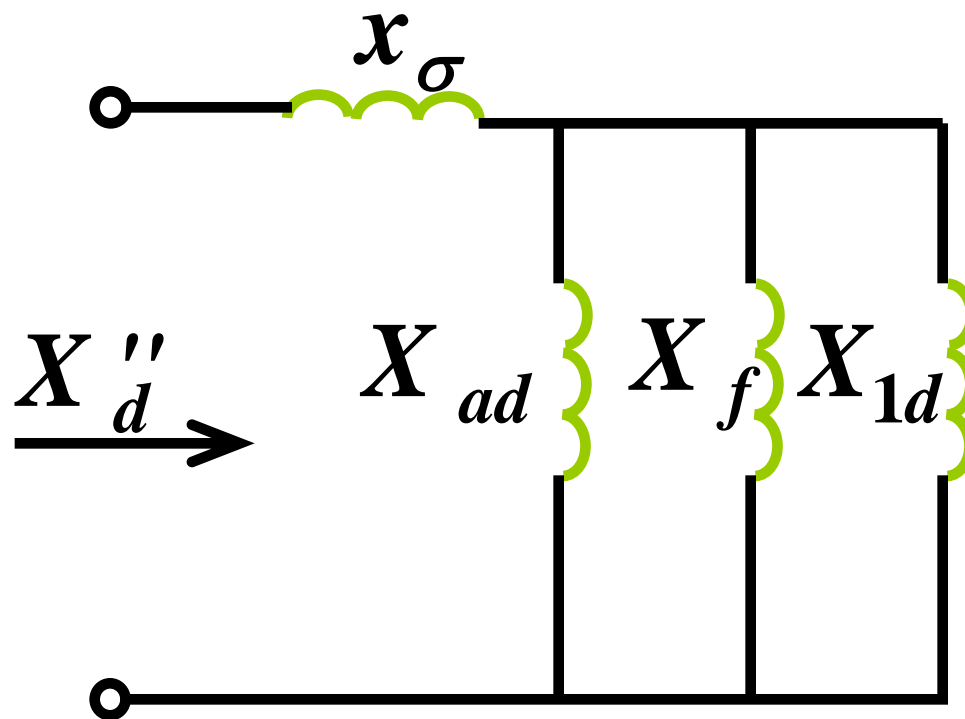
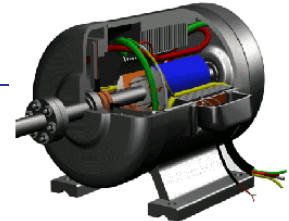
$$x_d'' = x_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_f} + \frac{1}{x_{1d}}}$$

x_{ad} —直轴电枢反应电抗；

x_f —励磁绕组的漏抗；

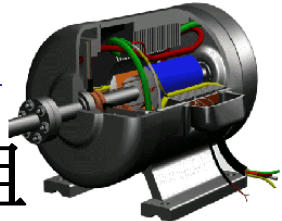
x_{1d} —阻尼绕组在直轴的漏抗





直轴超瞬态电抗的等效电路





– 如在转子上没有阻尼绕组或者是当阻尼绕组中的感应电流衰减完毕

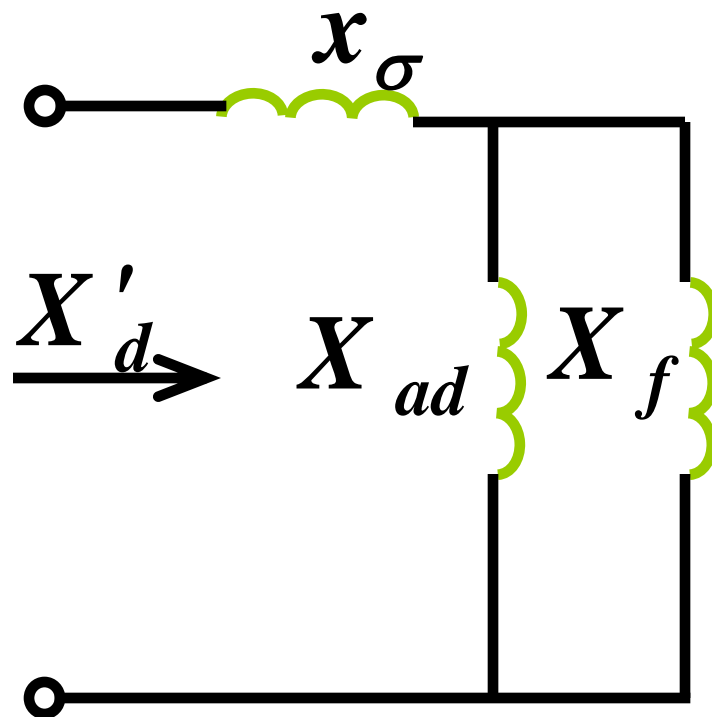
- 电枢反应磁通可以穿过阻尼绕组时，总磁导为

$$\Lambda'_d = \Lambda_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{\Lambda_{ad}} + \frac{1}{\Lambda_f}}$$

- 直轴瞬态电抗 x'_d

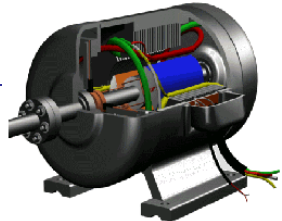
$$x'_d = x_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_f}} = x_\sigma + \frac{x_{ad} x_f}{x_{ad} + x_f}$$





直轴瞬态电抗的等效电路

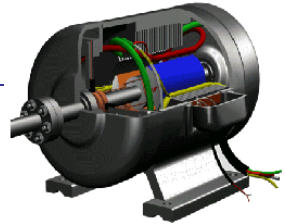




- 交轴瞬态电抗 x'_q 及其表示式

- 如果同步发电机不是出线端发生短路，而是经过负载阻抗短路，则由短路电流所产生的电枢磁场有交轴分量
- 由于沿着交轴的磁路与沿着直轴的磁路有不同的磁阻，所以相应的电抗也有不同的数值
- 在突然短路初瞬，沿着交轴的电抗便为 x'_q 和 x''_q 。
- x'_q 称为交轴瞬态电抗或交轴暂态电抗
- x''_q 称为交轴超瞬态电抗或交轴次暂态电抗





– 同步发电机在交轴一般没有激磁绕组

• 交轴瞬态电抗和交轴同步电抗相等，亦即

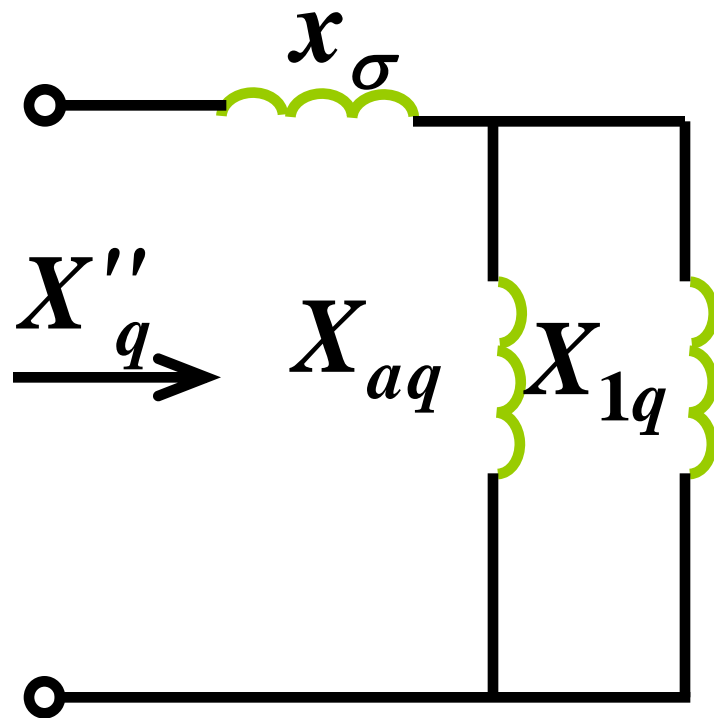
$$x'_q = x_q$$

• 交轴超瞬态电抗 x''_q 及其表示式

– 有阻尼时，由于阻尼绕组为一不对称绕组，所以它在交轴所起的阻尼作用与在直轴所起的阻尼作用不同

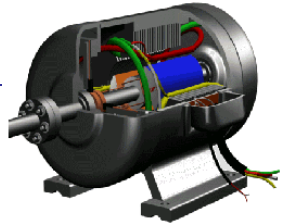
$$x''_q = x_\sigma + \frac{x_{aq}x_{lq}}{x_{aq} + x_{lq}}$$





交轴超瞬态电抗的等效电路





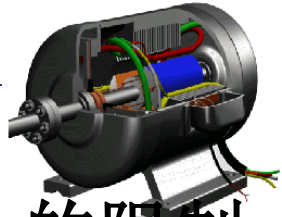
- x''_q 与 x''_d 大小比较

- 阻尼绕组在直轴所起的作用较在交轴所起的作用为大，故 x''_q 较 x''_d 略大
- 在由整块铁芯起阻尼作用的隐极式电机中，便 x''_d 和 x''_q 近似相等

- 超瞬态电抗与负序电抗间有一定的关系

- 设在定子端点上外施一负序电压，且令转子以同步转速旋转，转子绕组则保持短路状态。显然，此时电枢呈现的电抗即为负序电抗，定子电流受负序电抗的限制，即正比于 $\frac{1}{x_-}$





– 但是也可以这样分析

- 当电枢磁场掠过直轴时，定子电流将受 x''_d 的限制
- 当电枢磁场掠过交轴时，定子电流便由 x''_q 所限制
- 实有的定子电流可以认为受 x''_d 和 x''_q 的平均值所限制

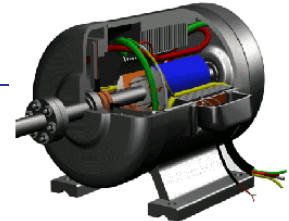
– x_- 可由 x''_{ad} 与 x''_{aq} 表示

$$\frac{1}{x_-} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x''_d} + \frac{1}{x''_q} \right)$$

– 或

$$x_- = \frac{2x''_d x''_q}{x''_d + x''_q}$$





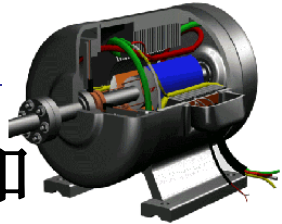
- 设外施负序电压并不直接加在电枢端点上，而是先经一很大的外接电抗 x_e ，然后加到电枢绕组，则

$$\frac{1}{x_- + x_e} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_d'' + x_e} + \frac{1}{x_q'' + x_e} \right)$$

- 当 x_d'' 和 x_q'' 与 x_e 相比非常小时，利用级数把上式展开并略去高次项，则有

$$x_- = \frac{1}{2} (x_d'' + x_q'')$$



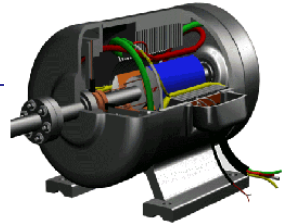


- 设接在电枢绕组和电源间的外接阻抗 x_e 适和负序电抗相等，则

- 即
$$\frac{1}{2x_-} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_d'' + x_-} + \frac{1}{x_q'' + x_-} \right)$$

$$x_- = \sqrt{x_d'' x_q''}$$



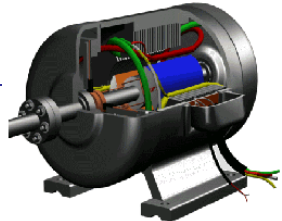


• 瞬态电抗和超瞬态电抗的测定

- 可以通过静止法的试验来测定
- 试验时定子绕组的一相开路，另两相串联并外施一单相低压交流电源，使定子电流不大于额定值。转子激磁绕组由电流表短接
- 缓缓转动转子，定子电流和转子电流均将变化，记下定子外施电压和定子电流的最大值 I_{\max} （此时转子绕组中的感应电流也最大）和最小值 I_{\min}

$$\left. \begin{aligned} x_d'' &= \frac{U}{2I_{\max}} \\ x_q'' &= \frac{U}{2I_{\min}} \end{aligned} \right\}$$





- 短路电流各分量

- 交变分量（亦称为周期性分量）
- 直流分量（亦称为非周期性分量）

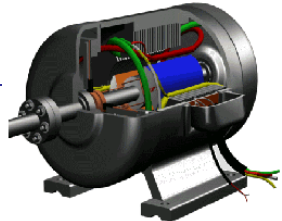
- 交流分量

- 大小相等，相位相差 120° ，是一组三相对称的电流分量

- 直流分量

- 与短路的瞬间有关，即和短路初瞬存在于绕组中的磁链有关





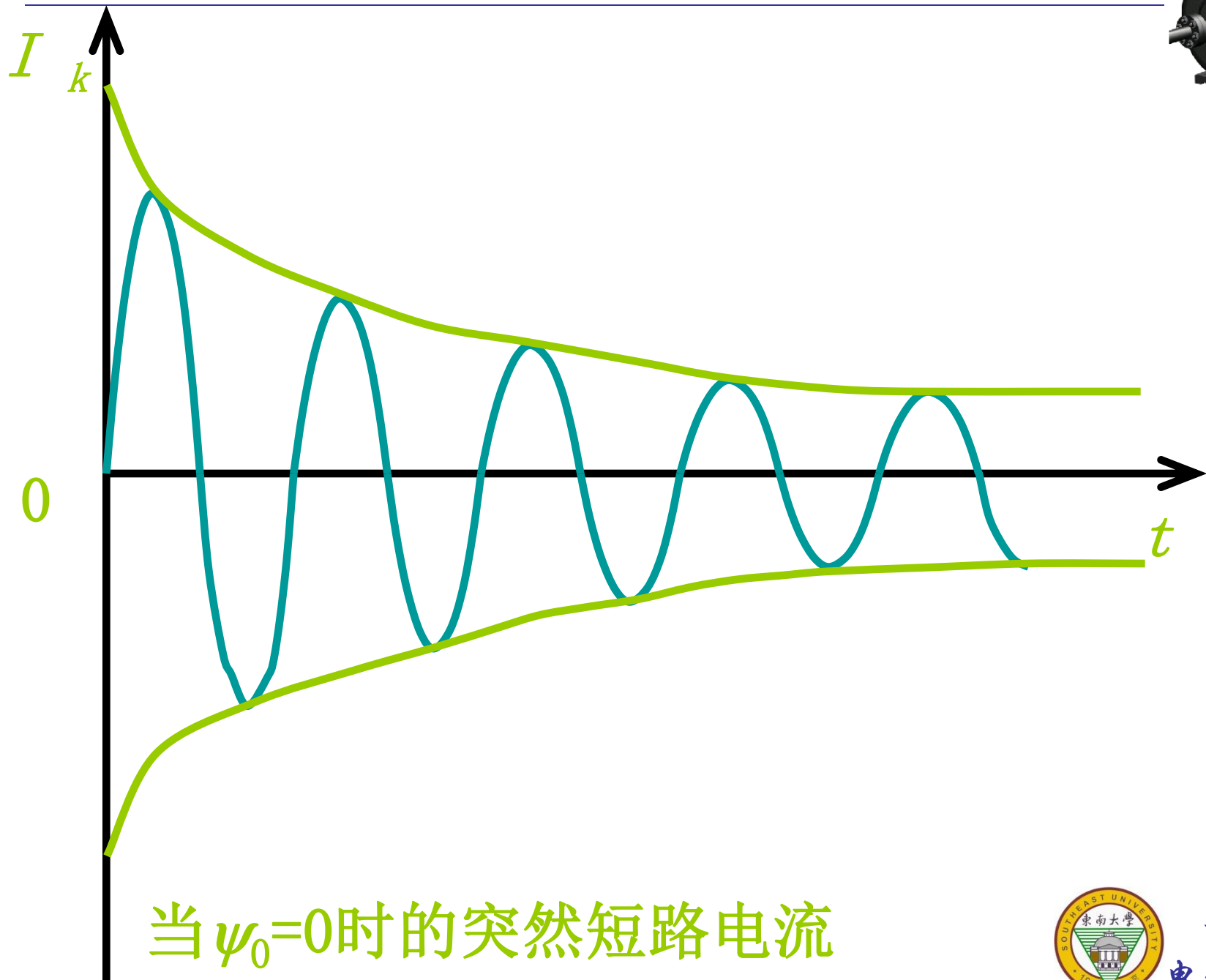
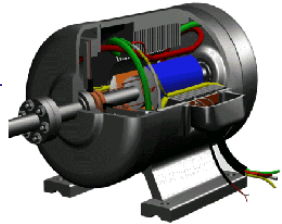
- 在短路初瞬，存在于各相绕组中的磁链是各不相同的，故各相的直流分量不相同，因此各相的短路电流是不相同的

- 两种极限的情况

- 短路初瞬，短路绕组的磁链 $\psi_0 = 0$
 - 短路绕组的轴适与交轴重合时短路
- 短路初瞬，短路绕组的磁链 $\psi_0 = \psi_{\max}$
 - 短路绕组的轴适与直轴重合时发生短路



三相突然短路电流



当 $\psi_0=0$ 时的突然短路电流

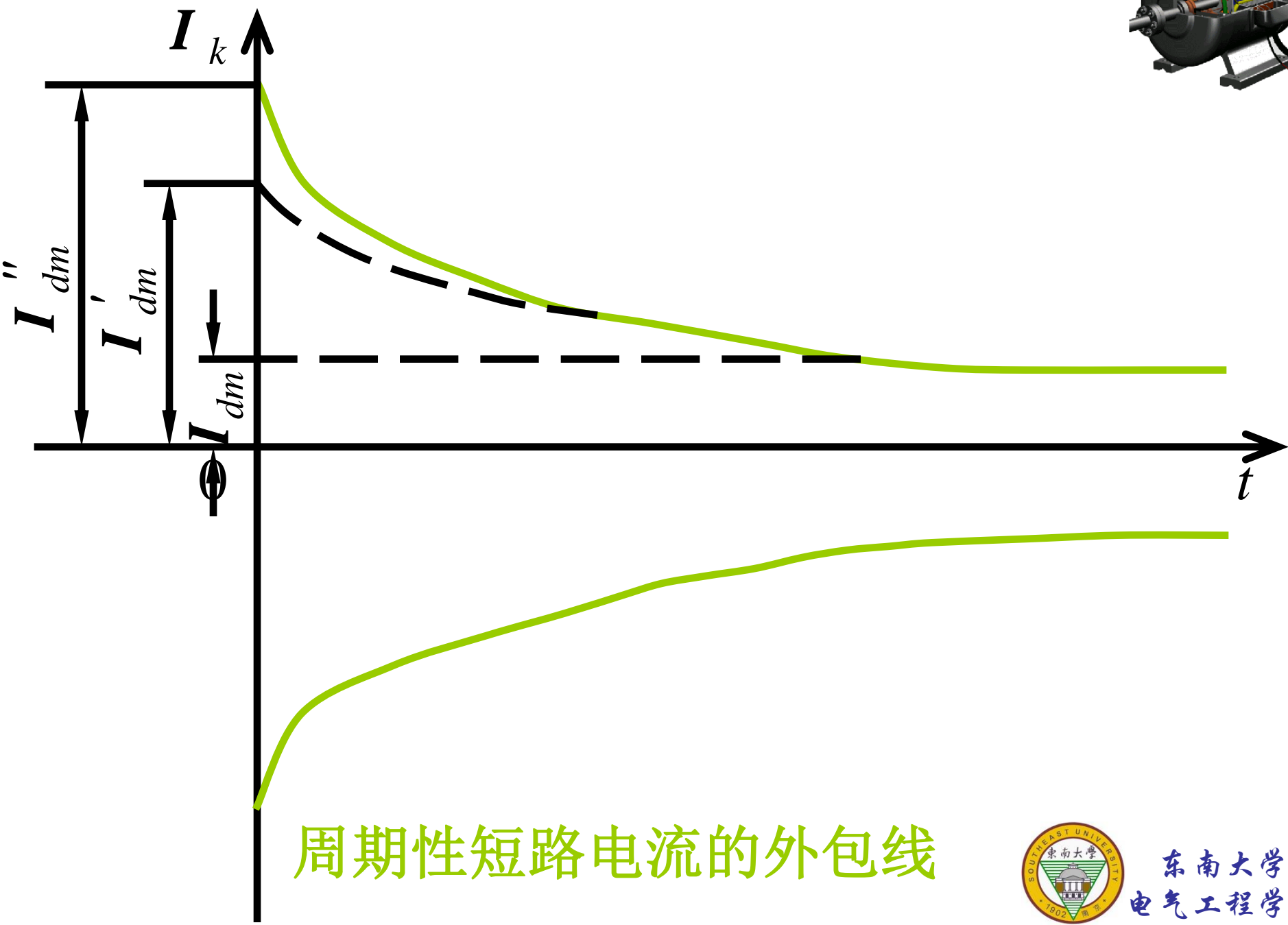




- 周期性短路电流变化分为三个阶段
 - 第一阶段：以时间常数 T_{d3}'' 衰减
 - 第二阶段：以时间常数 T_{d3}' 衰减
 - 第三阶段：稳定短路电流
- 该相突然短路电流的表示式为

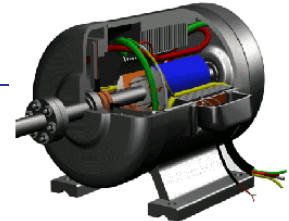
$$i_k = \left[\left(I_{dm}'' - I_{dm}' \right) \varepsilon^{-\frac{t}{T_{d3}''}} + \left(I_{dm}' - I_{dm} \right) \varepsilon^{-\frac{t}{T_{d3}'}} + I_{dm} \right] \sin \omega t$$





周期性短路电流的外包线





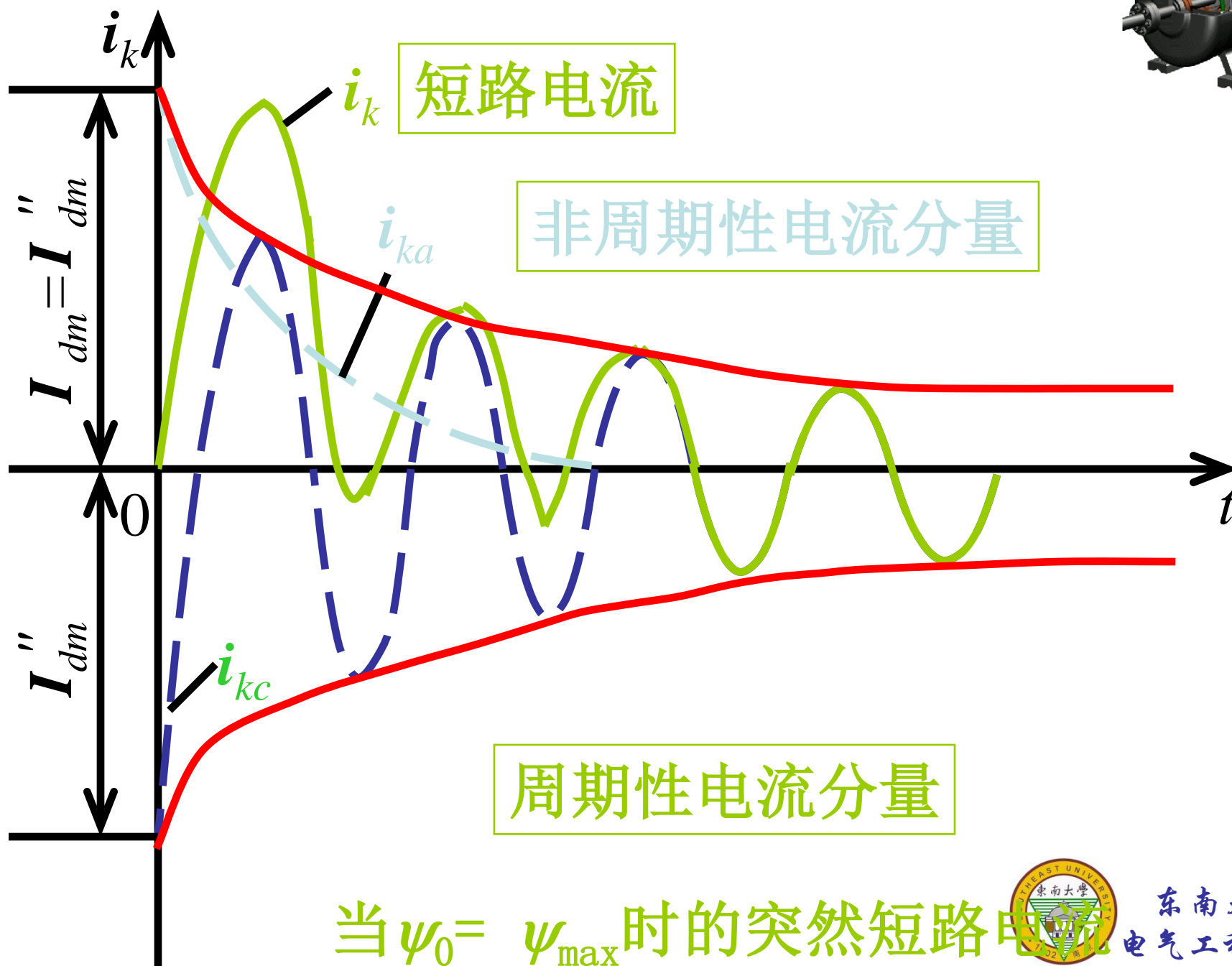
- 引入各种电抗

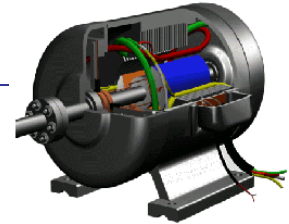
$$i_k = E_{0m} \left[\left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) \varepsilon^{-\frac{t}{T_{d3}''}} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \varepsilon^{-\frac{t}{T_{d3}'}} + \frac{1}{x_d} \right] \sin \omega t$$

- E_{0m} —空载电势的振幅



三相突然短路电流





- 设 T_{a3} 表示非周期性电流衰减的时间常数，
则短路电流中非周期性电流分量 i_{ka}

$$i_{ka} = I_{am} \varepsilon^{-\frac{t}{T_{a3}}}$$

- 周期性电流分量 i_{kc}

$$i_{kc} = \left[\left(I''_{dm} - I'_{dm} \right) \varepsilon^{-\frac{t}{T''_{d3}}} + \left(I'_{dm} - I_{dm} \right) \varepsilon^{-\frac{t}{T'_{d3}}} + I_{dm} \right] \sin(\omega t - 90^\circ)$$





— 总的短路电流为

$$\begin{aligned} i_k = E_{0m} & \left[\left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) \varepsilon^{-\frac{t}{T_{d3}''}} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \varepsilon^{-\frac{t}{T_{d3}'}} + \frac{1}{x_d} \right] \sin(\omega t - 90^\circ) \\ & + I_{am} \varepsilon^{-\frac{t}{T_{a3}}} \end{aligned}$$

— 令 $t = 0$, $I_k = 0$, 有 $I_{am} = I_{dm}''$





- 这是一种最不利的突然短路的情况，它将导致最大可能的冲击电流
- 极限情形：如果周期性电流和非周期电流都衰减得非常缓慢，即假设在 0.01s （半个周波）以后，两个分量都基本上没有衰减，则在此瞬间它们将直接相加，而使最高冲击电流达到周期性电流的起始振幅的2倍
- 最高冲击电流将出现于当 $t = T/2$ 时
- $\psi_0 = 0$ 突然短路情况，则最高冲击电流的极限值即和周期性电流的起始振幅相等，也将出现于当 $t = T/2$ 时

